

## 絶縁破壊電圧分布と熱劣化による変化

飯田 義直\*

### Distribution of the Breakdown Voltage and its Thermal Worsen

Yoshinao IIDA

#### ABSTRACT

Distribution of the polyethylene-terephthalate film capacitors breakdown voltage is the minimum double exponential extreme value at the early period. When the heat worsen the property of the insulation film, the distribution of the breakdown voltage change to the maximum double exponential extreme value.

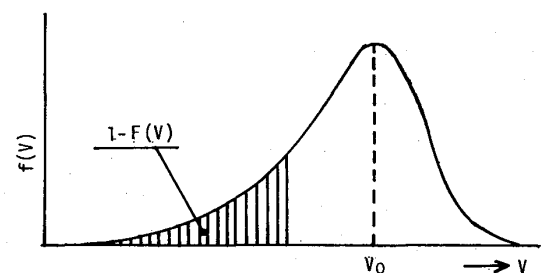
The relation between the mode  $V_0$  of the breakdown voltage distribution and the temperature  $T$  (absolute temperature) is shown in next formula.  $V_0 = A \cdot \exp(B/T)$ ,  $A$  and  $B$  is constant number. At the minimum extreme value distribution, relation between the breakdown voltage  $V$  and the probability  $F(V)$  having the breakdown voltage higher than  $V$ , is indicated in next formula.  $F(V) = \exp. [(-\exp. \alpha(V - V_0))]$ , where  $V_0$  is mode value.

#### 1. まえがき

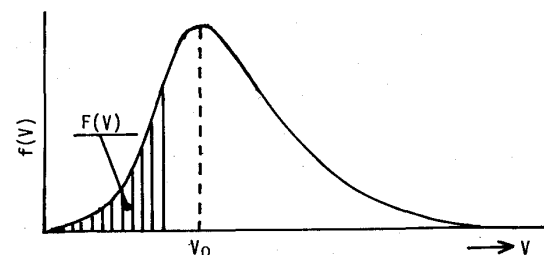
絶縁破壊電圧に関する測定結果は一般にばらつきの大きいものである。このばらつきの分布についての検討は Epstein, Brooks<sup>(1)</sup>により理論的に極値論の立場から行なわれた。また紙コンデンサの絶縁破壊電圧の分布は2重指数極値分布の一形体である最小値分布を示すことが加瀬<sup>(2)</sup>Gumbel<sup>(3)</sup>らにより理論考察の立証的立場から報告された。更にオイル(ポリブデン)含浸紙コンデンサの破壊電圧分布について、その温度による変化および静電容量の値の影響など(すなわち、電圧の印加される面積の影響)が、飯田らにより報告された。これらの結果から紙コンデンサの絶縁破壊電圧分布は2重指数最小極値分布であることが明らかにされた。更に紙コンデンサが熱電氣的に劣化した場合の破壊電圧分布は初期の最小値分布から2重指数最大極値分布に移行変化することが飯田<sup>(4)</sup>らにより指摘された。

しかしながら、近時絶縁材料として多用されている高分子材料およびフィルムについての絶縁破壊電圧分布についての検討は、ほとんど行なわれていない。

本研究においては、代表的な高分子絶縁材料であるポリエチレン・テレフタレート・フィルムを用いて製作した市販フィルム・コンデンサの絶縁破壊電圧分布について



(a) 最小値分布



(b) 最大値分布

図-1 極値分布の説明

て、次の諸項を検討したので報告する。

- (1) 直流電圧による破壊電圧分布の温度依存性
- (2) 静電容量と破壊電圧との関係
- (3) 熱劣化による破壊電圧分布の変化

まず、次節において2重指数極値分布とデーターの取扱い方について概説し、次に上記の諸点について、実験方法および結果などを述べる。

## 2. 2重指数極値分布

### 2. 1 2重指数極値分布および確率紙

極値分布には3種のタイプがあるが、一般に破壊という現象に対する、その大きさの分布は2重指数極値分布に従う場合が多いので、これについて概説する。

極値分布とは図1に示すように、確率密度関数 $f(V)$ （本論文では破壊電圧を対象としているので、変数に電圧 $V$ を用いた）が、最頻値（モード） $V_0$ より大なる側と小なる側で非対称となる分布であり、図の(a)は最小値分布、(b)は最大値分布と呼ばれている。

最小値分布において、ある電圧 $V$ よりも高い電圧で破壊する確率を $F(V)$ とすると2重指数極値分布においては次式で表わされる。

$$F(V) = e^{-e^{\alpha(V-V_0)}} \quad (1)$$

(1)式から

$$\ln[-\ln F(V)] = \alpha(V-V_0) = y \quad (2)$$

が得られる。従って、 $F(V)$ が0から1までの、それぞれの値に対して(2)式により $y$ を求め、横軸に $y$ および $F(V)$ で目盛ったグラフを用い、縦軸を破壊電圧 $V$ とすると、 $y=0$ がモード $V_0$ を示し、次式のような直線関係が得られる。

$$V = V_0 + (1/\alpha)y \quad (3)$$

この $(1/\alpha)$ は、破壊電圧分布の広がり具合を示すもので、正規分布の標準偏差に対応するものと考えてよい。上記のグラフは2重指数確率紙と呼ばれている。

### 2. 2 実測値の打点の仕方

まず、実測された $N$ 個のデータを最小値分布の場合には大なる順に番号 $n$ （ $1 \sim N$ ）を附し、最大値分布の場合には小なる順に番号 $n$ を附す。次に $F(V) = n/N + 1$ として2重指数極値確率紙に打点する。実測値が、それぞれの分布に適合している場合には打点はほぼ直線となり、最小値分布および最大値分布に対し、それぞれ次式の関係が得られる。

$$V = V_0 + (1/\alpha)y \quad (4)$$

$$V = V_0 - (1/\alpha)y \quad (5)$$

この直線は次の様な計算により求められる。それぞれの

実測値を $V_i$ とし、その平均値を $\bar{V}$ とする。また、それぞれの $V_i$ に対応する $y$ を $y_i$ とし、その平均値を $\bar{y}$ とする。次に $V_i$ 、 $y_i$ の標準偏差を、それぞれ $S_V$ 、 $\sigma_N$ とすると $V_0$ および $1/\alpha$ は次式により求められる。

$$V_0 = \bar{V} - (1/\alpha)\bar{y} \quad (6)$$

$$1/\alpha = S_V/\sigma_N \quad (7)$$

### 2. 3 管理曲線

前述の方法により実測点を2重指数極値確率紙に打点し、(4)~(7)により直線を決定した場合に、この直線から離れている実測点も存在する。この場合、管理曲線を求め実測点が管理曲線内にあれば、先に得られた(4)あるいは(5)式は破壊電圧値の分布を示すものと見なされ、著るしく多くの実測点が管理曲線外に出る場合には、破壊電圧の分布は2重指数極値分布でないことが解る。次に管理曲線の求め方について述べる。

確率紙に画かれた(4)または(5)式の直線上の任意の個所において、その $F(V)$ を横軸から求め、更に(2)式により、それに対応する $y$ の値を求める。これらの $F(V)$ 、 $y$ および測定に用いた試料の数 $N$ を用いて、次式により $\sigma_V$ （その点の標準偏差）を得る。

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{F(V)[1-F(V)]}{e^{(y-e^y)}}} \cdot \frac{1}{\alpha\sqrt{N}} \quad (8)$$

(4)または(5)式の直線上の任意の各点に対して得られる $\sigma_V$ の値を直線上の各値に加算および減算して得られる諸点を、なめらかな曲線となるように結んで得られる2本の曲線が管理曲線である。

### 2. 4 破壊電圧分布に対する静電容量の関係

破壊電圧の分布が2重指数極値分布をする場合、電圧の印加される面積が $n$ 倍となる（すなわち静電容量の比が $n$ 倍となる）試料の破壊電圧分布について述べる。この $n$ 倍ということは、 $n$ 個が1集団として取扱われることと同様であるから、その場合の $F(V)$ を $F_n(V)$ とすると

$$F_n(V) = [F(V)]^n = e^{-ne^y} \quad (9)$$

従って、(1)式(2)式を用いると

$$\ln[-\ln F_n(V)] = y = \ln(n) + \alpha(V-V_0) \quad (10)$$

ここに $V_0$ は $n=1$ の場合のモードである。(10)式から

$$\begin{aligned} V &= V_0 - (1/\alpha)\ln(n) + (1/\alpha)y \\ &= V_{n0} + (1/\alpha)y \end{aligned} \quad (11)$$

(11)式と(3)式と比較すると解るように、(11)式はモードが $(1/\alpha)\ln(n)$ 減少し、確率紙における直線の傾斜 $(1/\alpha)$ は変化しないことを示している。

2重指数極値分布をする破壊現象は、機械的な破壊すなわちロープや鉄筋などの引張り強度などにも適用される。この場合には、ロープや鉄筋の長さの比が、 $n$ に対

応することになる。

### 3. 試料と実験方法

#### 3. 1 試料

実験に用いられた試料は市販されているポリエチレン・テレフタレート・フィルム・コンデンサ 0.0047, 0.01 および  $0.1 \mu\text{F}$  である。いずれのコンデンサも、そのフィルム厚は  $6 \mu\text{m}$  1枚である。また、この試料コンデンサの構造は、上記のフィルムが巻回体された後に、圧力を加えて加熱し、小判形に成形されたものである。また、これらの試料はM社から提供された製品である。

#### 3. 2 実験方法

破壊電圧の測定は次のごとくにしてなされた。

(1)印加電圧：直流電圧。

(2)電圧上昇速度：破壊電圧の最高値が  $1.5 \text{ kV}$  以下の場合：  $25 \text{ V/秒}$ 。破壊電圧の最低値が  $1.5 \text{ kV}$  以上の場合：  $50 \text{ V/秒}$ 。

(3)破壊電圧の値はリーク電流が  $0.5 \text{ mA}$  を超過したときの電圧とした。

(4)試験温度：  $23^\circ\text{C}$  (室温),  $50^\circ\text{C}$ ,  $75^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$ ,  $125^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$ 。(  $50^\circ\text{C}$  以上の場合には恒温槽に入れてから  $5 \sim 10$  分後に測定を行なう )

(5)熱劣化：  $150^\circ\text{C}$  の恒温槽に、12, 24, 36, 48,

60 および 72 時間放置したのち  $150^\circ\text{C}$  の恒温槽中で測定する。

(6)各試験に用いた試料数(N)は、いずれの場合も 24 個である。また、試料の抜取は、ランダム・サンプリングとなる様に考慮された。

### 4. 実験結果と検討

#### 4. 1 破壊電圧分布と温度依存性

前述のようにして得られた各コンデンサの  $23^\circ\text{C}$  (室温) から  $150^\circ\text{C}$  の間における破壊電圧の測定結果から得られる破壊電圧分布は、2.2 および 2.3 に述べられた方法により検討された。

図-2 は  $0.0047 \mu\text{F}$  の破壊電圧分布の温度依存性の検討結果を示す。図中の 1 から 6 までの番号を附した直線は、それぞれ  $23^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$ ,  $75^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$ ,  $125^\circ\text{C}$  と  $150^\circ\text{C}$  に対する(4)式の関係を示すものである。直線 1 お

表1 各静電容量、温度に対する  $V_0$  および  $1/\alpha$  ( $\text{kV}$ )

$^\circ\text{C}$	$0.1 \mu\text{F}$		$0.01 \mu\text{F}$		$0.0047 \mu\text{F}$	
	$V_0$	$1/\alpha$	$V_0$	$1/\alpha$	$V_0$	$1/\alpha$
23	1.51	0.13	2.09	0.11	2.20	0.11
50	1.34	0.13	1.91	0.11	2.05	0.11
75	1.28	0.13	1.73	0.11	1.85	0.11
100	1.18	0.11	1.61	0.10	1.76	0.10
125	1.15	0.09	1.53	0.10	1.61	0.09
150	1.02	0.08	1.38	0.09	1.52	0.09

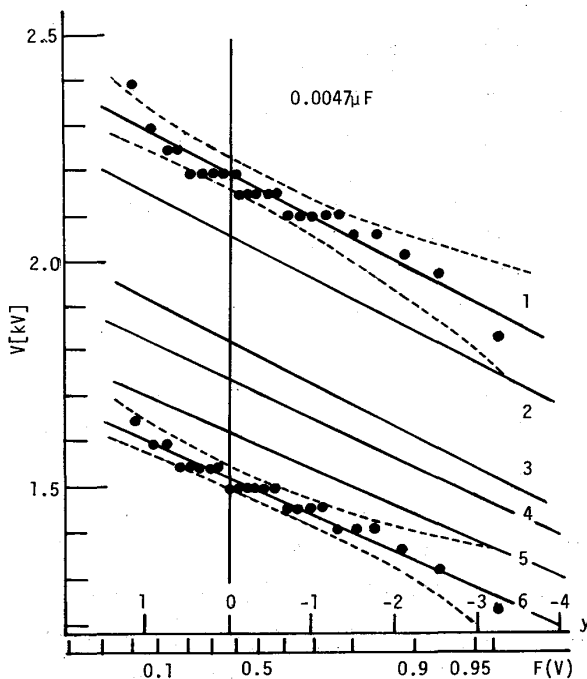


図-2 2重指数確率紙による破壊電圧分布の温度依存性

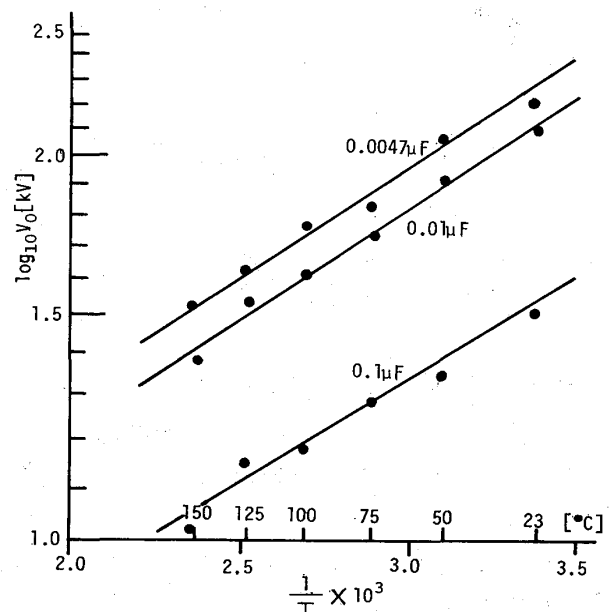


図-3  $\log V_0$  と  $1/T$  との関係

よび直線6 (150℃) に対しては、測定結果の打点と管理曲線とが記入されているが、他の場合には、これらが省略されている。0.01, 0.1  $\mu$ F の場合にも、図-2 と同様な結果が、確率紙の上に得られた。これらの検討結果から、各静電容量に対する各温度における破壊電圧分布は2重指数最小値極値分布であることが明らかになった。

また、各静電容量の試料の各温度における破壊電圧分布の検討結果から得られるモード  $V_0$  および  $1/\alpha$  の値を示したものが表1である。表1から明らかなように、

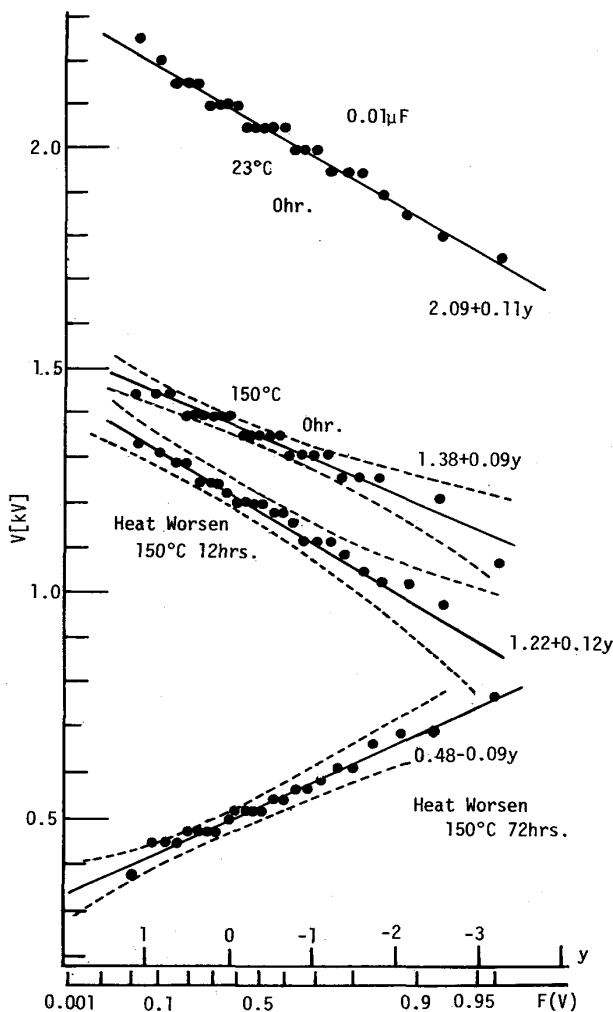


図-4 初期および150℃, 12時間, 72時間熱劣化後の破壊電圧分布

$1/\alpha$  の値は静電容量により大差なく、2・4の(11)式の解析結果と一致している。更に、 $1/\alpha$  の値は温度により変化しないことも解る。オイル含浸紙コンデンサの場合には $1/\alpha$  の値の温度による変化が著しい(23℃で $1/\alpha = 0.51 \text{ kV}$ , 150℃で $1/\alpha = 0.21 \text{ kV}$ )のに比し、これは極めて特徴的なことである。

次に  $V_0$  の値の温度による変化についての検討結果に

ついて述べる。図-3は  $V_0$  の対数と  $1/T$  ( $T$  は測定温度を絶対温度で示したもの) との関係を示したものである。これらの検討結果から、 $V_0$  と温度  $T$  との関係は次式で示される。

$$V_0 = Ae^{B/T} \quad (12)$$

ここに、 $A$ ,  $B$  は定数

#### 4. 2 破壊電圧分布の熱劣化による変化

3・2の(5)の様にして熱劣化試験を行なった場合の破壊電圧分布について述べる。

図-4は熱劣化前の23℃および150℃の破壊電圧分布および150℃で12時間, 72時間熱劣化後の150℃中における破壊電圧分布を2重指数確率紙に示したものである。図から明らかな様に、12時間後の分布のモード  $V_0$  は初期の値より低下しているが、分布の形体は最小値分布である。しかしながら、熱劣化が更に進むと最終的に破壊電圧分布は最大値分布に移行している。

実験結果によると、熱劣化24時間, 36時間における破壊電圧分布は2重指数極値分布および正規分布いづれにも適合せず、48時間以上の熱劣化で2重指数最大値極値分布を示す破壊電圧特性が得られた。図-5は、これらの結果を示すものである。同図の横軸は150℃での熱劣化時間、縦軸はモード  $V_0$  を示すものである。但し2

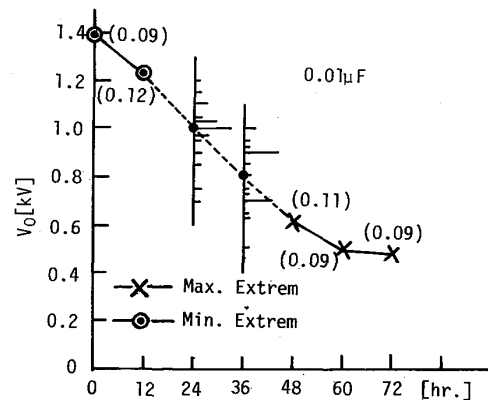


図-5 熱劣化時間と  $V_0$  との関係

重指数極値分布を示さない24, 36時間に対しては平均値を打点し、更に破壊電圧の棒グラフを示してある。また、2重指数極値分布を示す場合には、その分布の  $1/\alpha$  の値が、それぞれの打点に附記されている。図から明らかな様に、熱劣化が進み破壊電圧分布が最大値分布を示す様になると、モード  $V_0$  の低下は次第に少なくなる。すなわち、60時間および72時間熱劣化後の破壊

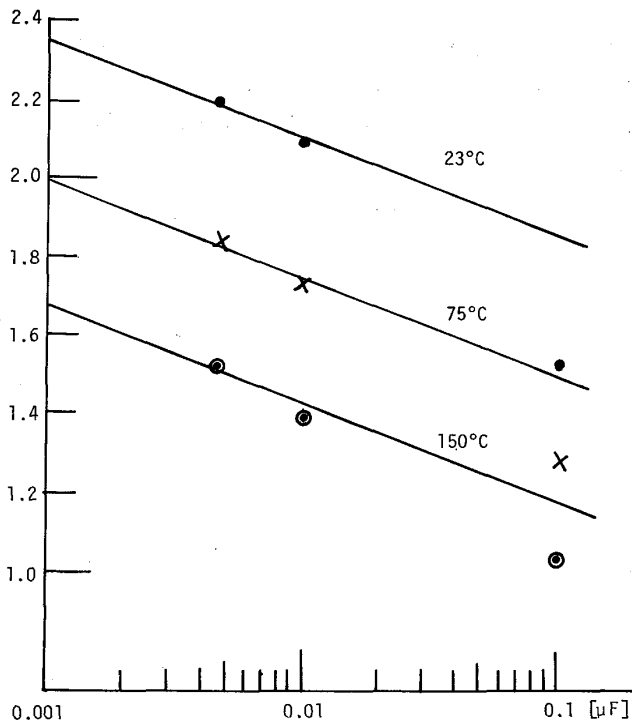


図-6 静電容量とモード  $V_0$  との関係

電圧分布の2重指数確率紙上における直線は、それぞれ他者の管理曲線内に入り、両者の分布の相違は明瞭に指適できない様になる。また、 $1/\alpha$ の絶対値の変化は認められない。

このような実験結果から、熱劣化後(150℃, 72時間)  $10^{-3}$ の確率で破壊する電圧(150℃中で)は0.275 kV,  $10^{-4}$ の確率で破壊する値は0.250 kVと推定される。また、劣化前に  $0.4 \times 10^{-4}$ の確率で破壊する印加電圧の値は0.32 kV ( $y = -10$ )と推定され、0.25 kV以下で破壊する確率は  $3 \times 10^{-5}$  ( $y = -10.7$ )と推定される。(推定の計算に必要な  $1/\alpha$ の値には、表1の  $1/\alpha$ の平均値0.106を用いた)

#### 4.3 静電容量と破壊電圧との関係

静電容量が相違する場合の破壊電圧分布に関する理論的解析は2.4のごとくであり、 $1/\alpha$ の値は変わらない。このことについては4.1および表1で示されている。また、静電容量を  $C_1$ ,  $C_2$  とすると、それぞれのモードを  $V_{01}$ ,  $V_{02}$  で表わせば、(11式より次の関係が得られる。

$$V_{01} - V_{02} = 2.3 \frac{1}{\alpha} \log \frac{C_2}{C_1} \quad (13)$$

図-6は、この(13式)の関係を示す実験結果である。同図の横軸は各静電容量の対数を示し、縦軸はモードを示す。図には、23, 75, 150℃の場合について示し、それぞれの打点に対しての直線は表1の  $1/\alpha$ の平均値0.106

を用いて(13式)により得られた計算結果を示すものである。実験結果は0.0047, 0.01 μF に対して計算結果と良く一致しているが、0.1 μFの実験結果は一致していない。この原因として次の事項が考えられる。

(1)コンデンサを小判形に形成する熱処理時間が、0.1 μFの場合、他に比して長い。(この処理温度は160～180℃程度)

(2)0.1 μFの素子は大形となるため、巻回体するとき、フィルムに加わる張力が強くなる。

この様に破壊電圧分布を検討することにより、製作工程における諸要因の分析などが可能になる。また、テープ等を巻回体として絶縁する場合にテープに加わる張力についても考慮する必要があることが示唆される。

#### 5. まとめ

絶縁破壊電圧の測定値を、その平均値として捉えないで、その分布の形体として検討することは、劣化の度合、その他の要因などの認識に有用である。本論文では、分布の形体の捉え方について述べ、フィルム・コンデンサ破壊電圧分布の温度依存性、熱劣化の姿態などの実験結果について検討した。次に、これらの結果の要約を示す。

(1)初期の破壊電圧分布の形体は、2重指数最小値極値分布である。〔図-2参照〕

(2)破壊電圧分布のモード  $V_0$ の温度依存性は、絶対温度  $T$ の逆数( $1/T$ )と指数関数の関係にある。〔(12式、図-3参照)〕

(3)破壊電圧分布の広がり(度合)を示す  $1/\alpha$ の値は、温度および静電容量により変化しない。〔表3参照〕

(4)熱劣化の初期には、破壊電圧分布のモード  $V_0$ は減少するが、その分布の形体は変わらず2重指数最小値極値分布である。〔図-4、図-5参照〕

(5)熱劣化が進行すると、破壊電圧分布は2重指数最小値極値分布から最終的には2重指数最大値極値分布に移行する。〔図-4、図-5参照〕

(6)絶縁破壊電圧分布のモード  $V_0$ と静電容量との関係は(13式となるが、実験結果が、この関係と異なる場合には、その要因を検討することも必要である。〔図-6参照〕

本論文では、150℃での熱劣化による破壊電圧分布の変化を検討したが、同様にして種々な温度で検討することにより、絶縁破壊電圧の熱劣化と温度との関係が明らかになる。その結果は、信頼性の検討および設計における安全率の適正化などに極めて有用な資料となる。

実験に協力された本学学部学生(当時)加筑信行君に謝意を表す。

## ◁参考文献▷

- (1) Epstein, Brooks: "The theory of extreme values and its implication in the study of the dielectric strength of paper capacitors" J. App. phy. Vol. 19, Jan., 544, (1948)
- (2) 加瀬滋男: コンデンサ評論(1958)11巻, 2号. p101,
- (3) Gumbel: "Statistical teory of extreme values and some practical applications" National Bureau of Standards Applied Mathematical 33.
- (4) 飯田, 宮谷: 昭33電気関係学会関西支部連大60